



Modelado de la interacción fluido estructura (FSI) para el diseño de una turbina eólica HAWT

Modeling of the fluid structure interaction (FSI) for the design of a HAWT wind turbine

Kevin Molina¹, Daniel Ortega², Manuel Martínez³, William Pinto-Hernández⁴,
Octavio Andrés González-Estrada⁵

¹ Grupo de Investigaciones Ciencias Básicas Aplicadas (Gicba), Unidades Tecnológicas de Santander, Bucaramanga, Colombia.
Email: kevinandrey212@gmail.com

² Grupo de Investigaciones Ciencias Básicas Aplicadas (Gicba), Unidades Tecnológicas de Santander, Bucaramanga, Colombia.
Email: dao-1995@hotmail.com

³ Grupo de Investigación en Energía y Medio Ambiente (Giema), Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Email: mjmartin@uis.edu.co

⁴ Grupo de Investigación en Energía y Medio Ambiente (Giema), Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Email: wpintoh@uis.edu.co

⁵ Grupo de Investigación en Corrosión (GIC), Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Orcid: 0000-0002-2778-3389. Email: agonzale@uis.edu.co

Recibido: febrero 14, 2018. Aceptado: mayo 2, 2018. Versión final: mayo 28, 2018.

Resumen

En este trabajo se estudia el comportamiento mecánico del álabe de una turbina eólica, analizando el impacto del diseño del álabe en la cantidad de energía generada, y su respuesta estructural en función de las fuerzas inducidas por el flujo de aire. Para estudiar la relación entre las fuerzas del flujo, los desplazamientos y esfuerzos provocados en la estructura, utilizamos un modelo de interacción fluido estructura (FSI). La estructura del álabe se diseña por medio de la teoría del momento y el elemento de pala (BEM), tomando como puntos de partida constantes referentes al viento (velocidad, densidad, Reynolds) y la selección de un perfil recomendado por la NACA, RISO, DU o NREL. Posteriormente, se efectúa el mismo procedimiento para un perfil diseñado mediante teorías de desempeño. Teniendo los resultados de estos dos tipos de álabes, se realiza una comparación de los esfuerzos y desplazamientos debidos a las variaciones entre el perfil diseñado y el perfil seleccionado, estudiando cómo esta variación afecta la energía generada de la turbina y su integridad estructural.

Palabras clave: álabe; BEM; diseño de perfiles; FSI; turbina eólica; HAWT.

Abstract

In this work, the mechanical behavior of the blade of a wind turbine is studied, analyzing the impact of the design of the blade on the amount of energy generated and its structural response as a function of the stresses induced by the air flow. In order to study the relationship between flow forces, deformations and stresses induced in the structure, a Fluid Structure Interaction (FSI) model was used. The blade structure is designed using blade element momentum theory (BEM), taking as a starting point constant properties related to the wind (speed, density, Reynolds), and the selection

ISSN impreso: 1657 - 4583, ISSN en línea: 2145 - 8456

Este artículo puede compartirse bajo la licencia **CC BY-ND 4.0** y se referencia usando el siguiente formato: K. Molina, D. Ortega, M. Martínez, W. Pinto-Hernández, O. A. González-Estrada, "Modelado de la interacción fluido estructura (FSI) para el diseño de una turbina eólica HAWT," *Rev. UIS Ing.*, vol. 17, no. 2, pp. 269-282, 2018. Doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018023>

of a profile recommended by NACA, RISO, DU or NREL. Then, the same procedure is used for a profile designed using performance theories. Having these results for both types of blades, a comparison of the stresses and deformations due to the variations between the designed profile and the selected profile was made, analyzing the effects on the generated energy and the structural integrity of the turbine.

Keywords: blade; BEM; FSI; HAWT; profile design; wind turbine.

1. Introducción

El estudio de las energías renovables es actualmente un área prioritaria de investigación en ingeniería [1], [2]. En el área de aerogeneración, el diseño y modelado de álabes es uno proceso fundamental, no solo por el hecho de que se invierte mucho tiempo y dinero en prototipos y sus posteriores estudios, sino porque de este diseño depende la cantidad de energía que se conseguirá del aire [1], [3]. Esto hace que la variación de los parámetros de un álabe tenga gran influencia sobre la cantidad de energía generada, ya sea por la alteración de la geometría de sus perfiles, o como tal por su estructura [4], [5].

Zhu y Shen [6] exponen el desarrollo de diferentes pasos en el diseño por optimización de la estructura de un álabe, con ayuda del método de momento y el elemento de pala, BEM, y algunas correcciones propuestas por Prandtl para este método. Asimismo, el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) [7] muestra el uso de las teorías de diseño de álabes utilizando BEM, y aplica nuevos métodos como el *generalized dynamic wake* (GDW). Dykes *et al.* [8] también presentan una nueva propuesta de optimización, no solo de la estructura del álabe, sino que abarca el desarrollo de toda una planta aerogeneradora, la cual optimiza desde la estructura de la turbina y todos sus componentes, hasta el costo de esta y su energía generada.

Recientemente, Phelps y Singleton [9] exponen el diseño y optimización de una turbina eólica de eje horizontal, HAWT, que con ayuda de un modelo de interacción fluido estructura, FSI, desarrolla el diseño de un larguero de soporte en el álabe, lo que disminuye la cantidad de material y, por ende, el costo de este, de forma que se obtienen los espesores de la superficie del álabe, de su larguero y su costo. Con las mismas herramientas, Stout *et al.* [10] comparan la eficiencia de un rotor de eje vertical, VAWT, optimizado con respecto al original.

Este trabajo analiza el impacto de la variación geométrica de los perfiles de una turbina eólica HAWT, por medio de la interacción fluido estructura, utilizando el método BEM para el desarrollo de los álabes y un proceso de optimización de forma por sensibilidad para el desarrollo de un álabe con perfiles optimizados. También se comparan los resultados con una turbina Nordex N120.

2. Álabes

Los álabes son la esencia de un aerogenerador, ya que de estos depende la cantidad de energía que se obtendrá del viento [11]. Por lo general están divididos en 4 secciones con una longitud en función de la envergadura del álabe [12] (raíz de pala, 12 %; interna, 25 %; central, 50%, y externa, 25%), como se muestra en la figura 1.

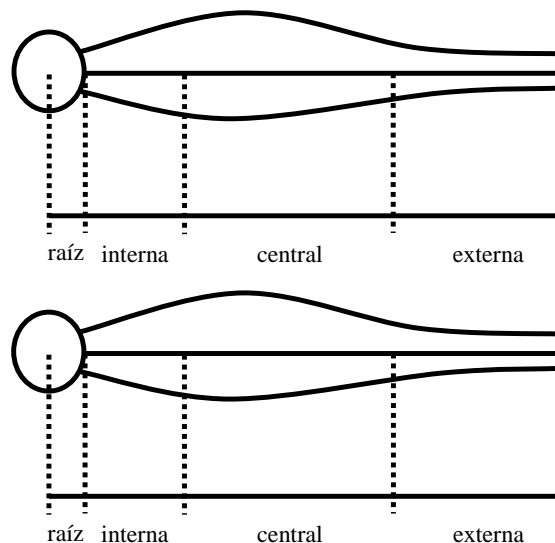


Figura 1. Secciones de un álabe. **Fuente:** elaboración propia.

2.1. Perfiles aerodinámicos

El corte transversal de cada sección está dado por lo que se conoce como perfil aerodinámico, del que dependen las fuerzas aerodinámicas de sustentación L y arrastre D , así como sus respectivos coeficientes de sustentación y arrastre C_l y C_d , respectivamente. Entre secciones se produce una variación de estos perfiles buscando hacer más eficiente el trabajo del álabe, esto se logra escogiendo los perfiles según la función que cumplen en cada una de las secciones.

La raíz de la pala cumple una función estructural, por lo que para esta se necesita un perfil con un área considerable que soporte altos esfuerzos. Por otro lado, la sección interna, aunque debe soportar esfuerzos, cumple un papel de generador de energía a muy bajas velocidades, y se hace necesario un perfil con un C_l alto

para estas condiciones. La parte más larga del álabe es la parte central y se encarga de sacar el mayor provecho a la energía del viento. Una de las características de sus perfiles es que tienen una relación de C_l/C_d alta, esto con el fin de generar mayor energía, además de que estos perfiles tienen un ángulo elevado de entrada en pérdida, ya que, al ser la parte más larga del álabe, deben poseer una región amplia en la que puedan variar los ángulos de incidencia de sus perfiles. Por último, la parte externa que, además de generar energía, debe disminuir las pérdidas producidas por diferencias de presiones al final de la punta. Sus perfiles poseen elevados coeficientes de sustentación, pero bajos coeficientes de arrastre para disminuir las pérdidas mencionadas.

Bertagnolio [13] proporciona algunas recomendaciones de perfiles NACA serie 6 utilizados generalmente en aerogeneradores, además de gráficas de coeficientes de sustentación y arrastre en función de su ángulo de incidencia. Esta serie contiene 6 números para su caracterización. Como ejemplo, tenemos el NACA 63-215, donde el primer número, “6”, hace referencia a la serie del perfil; el segundo número, “3”, dice la localización de la presión mínima en función de la cuerda; el tercer número, “2”, es el coeficiente de sustentación de diseño, los últimos dos dígitos, “15”, representan el máximo espesor de la cuerda. Los perfiles recomendados para aerogeneradores de eje horizontal son los siguientes:

- NACA 63-215, NACA 63-218, NACA 63-221.
- NACA 63-415, NACA 63-418, NACA 63-421.
- NACA 64-415, NACA 64-421.
- NACA 65-415, NACA 65-421.

Se realizaron las polares de cada uno con ayuda del programa Javafoil [14], de donde se consiguieron los valores de C_l y C_d para diferentes ángulos de ataque α (entre 0° y 30°) y Reynolds (entre 50000 y 100000). Con estos valores se escogieron manualmente los perfiles teniendo en cuenta las diferentes características para cada sección. Para la sección interna se obtuvo el perfil NACA 64-421 que tiene un alto C_l a bajos Reynolds y α (5° a 10°), teniendo además la mayor área con respecto a los demás perfiles. Para la sección media se eligió el NACA 63-421 con el C_l más alto a diferentes Reynolds y α . Por último, en la sección externa se decidió por el NACA 63-221 por tener un bajo C_d a altos Reynolds y α (15° a 30°).

Para la optimización de perfiles se tomó como punto de partida los perfiles escogidos para cada sección del álabe. En cada uno se optimizó un parámetro diferente, dependiendo de su función ya descrita, mejorando en el perfil interior su C_l a bajas velocidades (7 m/s), en el

medio una mejor relación entre el C_l y C_d y, por último, en el exterior un menor C_d sin disminuir su C_l .

En la optimización de estos perfiles se usó un método de sensibilidad con respecto a la geometría mediante el módulo Adjoint Solver del *software* ANSYS [15]. En este caso la geometría es el perfil y la sensibilidad está dada por la relación del perfil con las fuerzas aerodinámicas. Los cambios en el perfil son producidos en los puntos de mayor sensibilidad con el fin de disminuir o aumentar estas fuerzas y que su cambio con respecto al cambio geométrico sea mínimo, de modo que se obtenga un perfil optimizado.

2.2. Método BEM

El método BEM es muy utilizado en la actualidad para el desarrollo de la geometría de hélices. Este se fundamenta a partir de la relación de las teorías de momento y del elemento de pala, haciendo uso de parámetros referentes a los perfiles aerodinámicos, la geometría de la turbina (número de aspas, envergadura de los álaves) y el viento (velocidad, viscosidad cinemática).

2.2.1. Teoría de momento

Una manera de explicar la teoría de momento es mediante el modelo de Rankine-Froude [7], [15]. Esta toma la hélice como un disco infinitamente delgado y divide el campo de flujo en 4 secciones, mostradas en la figura 2. En la primera sección, el viento entra con velocidad V_1 , presión P_1 y en estado laminar. A medida que avanza hacia la sección 2 este pierde velocidad hasta alcanzar V_2 . En este punto atraviesa la hélice hasta la sección 3, y no se produce un cambio significativo en la velocidad, por lo que $V_2 = V_3 = V$, pero sí se produce una variación de presión debido a la energía obtenida por la hélice $P_2 \neq P_3$. El viento continúa avanzando hasta salir por la sección 4 con una velocidad V_4 ; aquí las presiones se igualan con la presión de entrada $P_1 = P_4$.

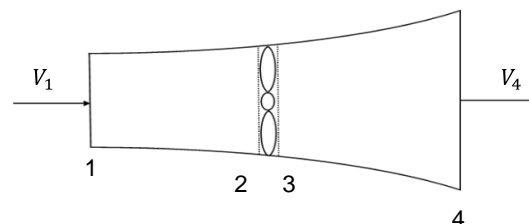


Figura 2. Modelo de Rankine-Froude. **Fuente:** elaboración propia.

Se utiliza el teorema de Bernoulli para analizar el modelo, esto no se puede realizar a lo largo del campo de flujo debido al salto de presión producido por la hélice,

así que se realiza entre las secciones 1-2 y 3-4, de lo que se obtienen las siguientes ecuaciones, donde ρ es la densidad del aire:

$$\frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_2^2) = (P_2 - P_1), \quad (1)$$

$$\frac{1}{2}\rho(V_3^2 - V_4^2) = (P_4 - P_3). \quad (2)$$

Con las ecuaciones (1) y (2), y teniendo en cuenta las condiciones $V_2 = V_3$ y $P_1 = P_4$, se obtiene:

$$\Delta P = P_2 - P_3 = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_4^2). \quad (3)$$

Teniendo las diferencias de presión en la hélice se logra hallar la fuerza de empuje ejercida sobre esta:

$$dF_x = \Delta P dA = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_4^2) dA. \quad (4)$$

Además, por la ecuación de cantidad de movimiento axial y de continuidad de caudal:

$$\begin{aligned} F_x &= \int_A V \rho (V dA), \\ F_x &= V_4 \rho V_4 A_4 - V_1 \rho V_1 A_1, \\ \text{Caudal} &= \rho V_4 A_4 = \rho V_1 A_1 = \rho V_2 A, \end{aligned}$$

Se obtiene la ecuación:

$$dF_x = \rho V_2 (V_1 - V_4) dA. \quad (5)$$

Con las ecuaciones (4) y (5) se obtiene:

$$V_2 = \frac{V_1 + V_4}{2}. \quad (6)$$

Y al incluir un factor de inducción axial a :

$$\begin{aligned} a &= \frac{V_1 - V_2}{V_1}, \\ V_2 &= V_1(1 - a), \end{aligned} \quad (7)$$

Se obtiene la ecuación (8), que elimina la variable V_4 de la ecuación (4):

$$V_4 = V_1(1 - 2a) \quad (8)$$

$$dF_x = \pi \rho V_1^2 [4a(1 - a)] r dr. \quad (9)$$

Ahora se analiza la cantidad de momento angular para la hélice, con el fin de hallar el torque generado sobre esta.

$$T = \frac{dL}{dt}; \quad \frac{dL}{dt} = \frac{dI}{dt} \omega; \quad \frac{dI}{dt} = \frac{dm}{dt} r^2.$$

Siendo L el momento de inercia; I , el momento angular, y ω , la velocidad angular inducida por la hélice sobre el viento. Así que:

$$\begin{aligned} T &= \frac{dm}{dt} r^2 \omega, \quad \frac{dm}{dt} = \dot{m} = \rho A V_2, \\ dT &= \rho V_2 r^2 \omega dA = 2\pi \rho V_2 \omega r^3 dr. \end{aligned} \quad (10)$$

Al igual que en las fuerzas de empuje, se introduce un factor de inducción radial (a') a la ecuación (10) para eliminar la variable ω :

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega}, \quad (11)$$

Donde Ω es la velocidad angular de la hélice. Recordando la ecuación (7) para eliminar V_2 :

$$dT = 4\pi \rho \Omega V_1 a'(1 - a) r^3 dr \quad (12)$$

Teniendo así las ecuaciones que gobiernan las fuerzas de empuje (9) y los torques (12), por medio de la teoría de momento.

Antes de seguir con la teoría de elemento de pala se debe agregar a estas ecuaciones un coeficiente de corrección de pérdidas Q , debido que las fuerzas axiales y de torque son afectadas por los vórtices creados por las diferencias de presión en las puntas. Este coeficiente es estudiado por diferentes autores y, en este caso, se escoge el planteamiento de Prandtl:

$$Q = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(e^{-\frac{B}{R} \frac{(1-r/R)}{\sin(\phi)}} \right), \quad (13)$$

Donde B es el número de álabes, R es la envergadura del álabe y ϕ es el ángulo de incidencia. El coeficiente se multiplica por las ecuaciones (9) y (12):

$$dF_x = \pi \rho Q V_1^2 [4a(1 - a)] r dr, \quad (14)$$

$$dT = 4\pi \rho Q \Omega V_1 a'(1 - a) r^3 dr. \quad (15)$$

2.2.2. Teoría del elemento de pala

La teoría del elemento de pala divide la hélice en elementos diferenciales para hallar las fuerzas ejercidas sobre cada uno, sin tener en cuenta los efectos de las secciones contiguas. Por lo general, el álabe es dividido en 10 a 20 elementos, cada uno de estos asociado a una velocidad de flujo Ωr , cuerda c y ángulo de incidencia ϕ diferente, con el fin de aprovechar mejor la energía del viento.

El análisis comienza definiendo los ángulos de incidencia de cada sección. Para esto es necesario recordar que sobre la velocidad del aire que incide sobre el perfil V_w se genera una velocidad angular ω , producida por Ω y en dirección contraria a esta, como se muestra en la figura 3. Así que al analizar las velocidades tangenciales del viento que golpean el perfil se produce una velocidad relativa V_{tr} , mostrada en la figura 4. Junto con la velocidad axial del viento definen ϕ en la ecuación:

$$\tan(\phi) = \frac{V_1 (1 - a)}{\Omega r (1 + a')} \quad (16)$$

Un factor importante en el diseño de álabes es la relación de velocidades locales de punta λ_r , la cual se hallará de manera gráfica más adelante, con ayuda del coeficiente de potencia y el tipo de rotor que se va a utilizar, el cual resulta de la ecuación anterior:

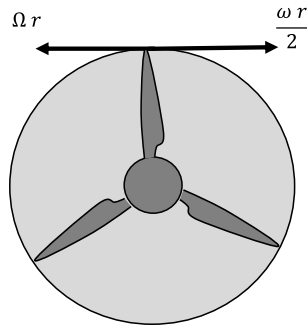
$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{V_1}.$$


Figura 3. Velocidades tangenciales de la hélice y el viento. **Fuente:** elaboración propia.

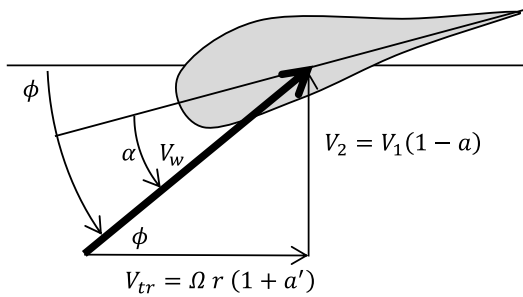


Figura 4. Descomposición de las velocidades del viento sobre el perfil. **Fuente:** elaboración propia.

Ahora se procede a definir las fuerzas que actúan sobre el perfil, como se puede ver en la figura 5. Las fuerzas están asociadas a la dirección con la que el viento incide sobre el perfil (la dirección de la fuerza de sustentación L es perpendicular y de arrastre D horizontal). Descomponiéndolas tangencial y axialmente se tiene:

$$dF_\theta = dL \sin(\phi) - dD \cos(\phi) \quad (17)$$

$$dF_x = dL \cos(\phi) + dD \sin(\phi) \quad (18)$$

Las fuerzas L y D se definen por sus coeficientes C_l y C_d :

$$dL = C_l \frac{1}{2} \rho V_w^2 c \, dr$$

$$dD = C_d \frac{1}{2} \rho V_w^2 c \, dr$$

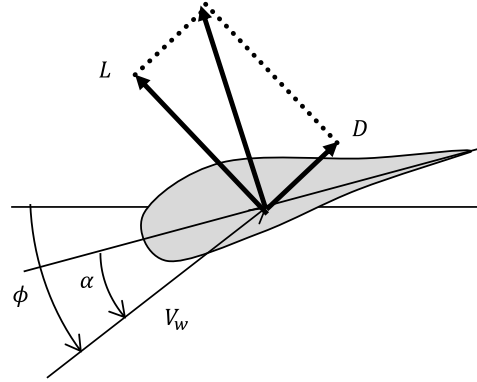


Figura 5. Fuerzas sobre el perfil. **Fuente:** elaboración propia.

Remplazando dL y dD , y agregando el número de álabes B en las ecuaciones (17) y (18) se obtiene:

$$dF_\theta = B \frac{1}{2} \rho V_w^2 c (C_l \sin(\phi) - C_d \cos(\phi)) \, dr, \quad (19)$$

$$dF_x = B \frac{1}{2} \rho V_w^2 c (C_l \cos(\phi) + C_d \sin(\phi)) \, dr. \quad (20)$$

Al multiplicar la fuerza tangencial por el radio se obtiene el torque generado dT :

$$dT = B \frac{1}{2} \rho V_w^2 c (C_l \sin(\phi) - C_d \cos(\phi)) r \, dr.$$

Remplazando V_w^2 en dT y dF_x se tienen las ecuaciones que gobiernan las fuerzas de empuje y las fuerzas radiales, por medio de la teoría del elemento de pala:

$$dF_x = \sigma' \pi \rho \frac{V_1^2 (1 - a)^2}{\sin^2(\phi)} (C_l \cos(\phi) + C_d \sin(\phi)) r \, dr, \quad (21)$$

$$dT = \sigma' \pi \rho \frac{V_1^2 (1 - a)^2}{\sin^2(\phi)} (C_l \sin(\phi) - C_d \cos(\phi)) r^2 \, dr, \quad (22)$$

σ' es la solidez local

$$\sigma' = \frac{B c}{2\pi r}.$$

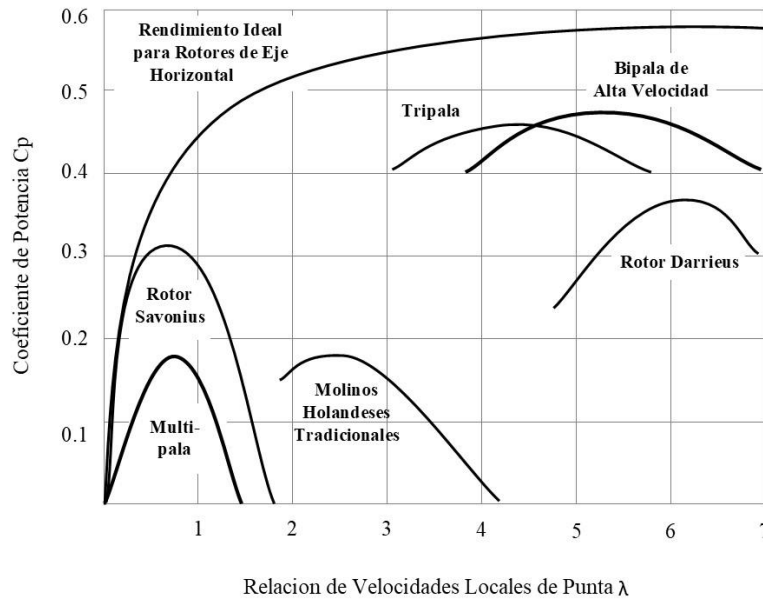


Figura 6. Rendimiento de hélices de molinos y turbinas de viento. **Fuente:** [18].

2.2.3. Relación

El método BEM relaciona dichas teorías dividiendo las ecuaciones de fuerza axial y las de torques, con el fin de despejar $a/(1-a)$ de las axiales y $a'/(1-a)$ de las tangenciales y tener las ecuaciones que definan los factores de inducción axial y tangenciales, con los cuales se hallarán la cuerda y ángulo de incidencia en cada sección:

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma' (C_l \cos(\phi) + C_d \sin(\phi))}{4 Q \sin^2(\phi)}$$

$$\frac{a'}{1-a} = \frac{\sigma' (C_l \sin(\phi) - C_d \cos(\phi))}{4 Q \lambda_r \sin^2(\phi)}$$

2.3. Diseño de álabes

Con ayuda de las ecuaciones planteadas por el método BEM, se comienza con el desarrollo del álabe. Este es un proceso iterativo en el que se supone un valor para los factores de inducción axial a y tangencial a' . Posteriormente, se desarrolla el método para el radio inicial de la sección interna del álabe y se halla c y ϕ , con estos se recalcula a y a' , se comparan estos con sus valores anteriores, si sus porcentajes de error son altos se realiza nuevamente la iteración con los nuevos valores.

Por el contrario, si estos son bajos se realiza el procedimiento para el siguiente radio.

Antes de comenzar a hallar a y a' se tendrán que definir algunos parámetros referentes a la geometría y el funcionamiento del generador (la envergadura de este R , el número de palas B y su velocidad de rotación ω). Como explica Ingram [16], la envergadura depende de la cantidad de potencia que se va a generar, y está dada por la siguiente ecuación:

$$P = C_p \eta \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_1^3$$

En donde C_p es el coeficiente de potencia esperado (0.424). [17], η es la eficiencia mecánica y eléctrica (0.9) [18] y V_1 es la velocidad del viento. Así obtenemos la envergadura del álabe.

El número de álabes es escogido de acuerdo con la figura 6, que está basada en prácticas experimentales. Teniendo C_p y sabiendo que es una turbina HAWT, la gráfica nos indica que podemos utilizar dos o tres álabes (bipala o tripala). Aunque las turbinas de dos son más económicas, se escoge una de tres, debido a que esta presenta mayor estabilidad [19]. Asimismo, es posible hallar la relación de velocidades con la que podemos hallar Ω :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_1}$$

Para hallar un valor inicial de a y a' , Ingram [16] recomienda el uso de las siguientes ecuaciones:

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_r} \right); \quad a = \left(1 + \frac{4 \sin^2(\phi)}{\sigma' C_l \cos(\phi)} \right)^{-1};$$

$$a' = \frac{1 - 3a}{4a - 1}$$

Para el cálculo de la cuerda:

$$C = \frac{8\pi r \sin(\phi)}{3B \lambda_r}$$

Desarrollando estas ecuaciones y la serie de iteraciones se parametriza la geometría del álabes.

3. Resultados

3.1. Rediseño de perfiles

Se realiza el modelado del campo de flujo sobre los perfiles seleccionados, para esto se escoge una geometría *C-mesh* utilizada comúnmente en el análisis de perfiles aerodinámicos [20] y mostrada en la figura 7 para el perfil NACA 63-221.

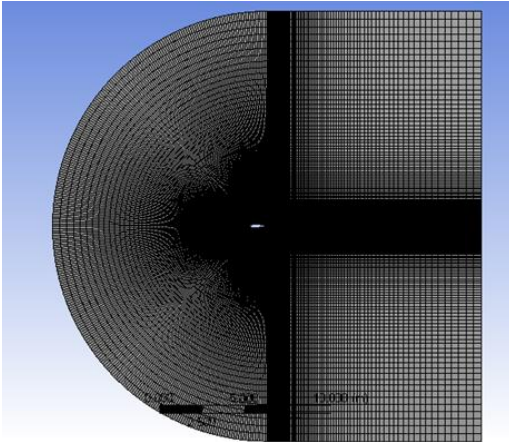


Figura 7. *C-mesh* del perfil NACA 63221. **Fuente:** elaboración propia.

Las condiciones de contorno utilizadas son las velocidades de entrada del aire. Estas tienen una magnitud y ángulo de ataque variante de un perfil a otro, debido a la velocidad angular de la pala y al ángulo de mayor aprovechamiento de energía, los cuales se observan en la tabla 1. Las velocidades de entrada actúan sobre los bordes *inlet*. Se tomó el borde *airfoil* como tipo *Wall*, y el borde *outlet* como *Pressure-outlet*. Estos se muestran la figura 8.

Tabla 1. Velocidades y ángulos de ataque del viento sobre los perfiles de cada sección.

Perfil	Velocidad [m/s]	Ángulo [°]
NACA 64-421	10	5
NACA 63-421	30	5
NACA 63-221	60	5

Fuente: elaboración propia.

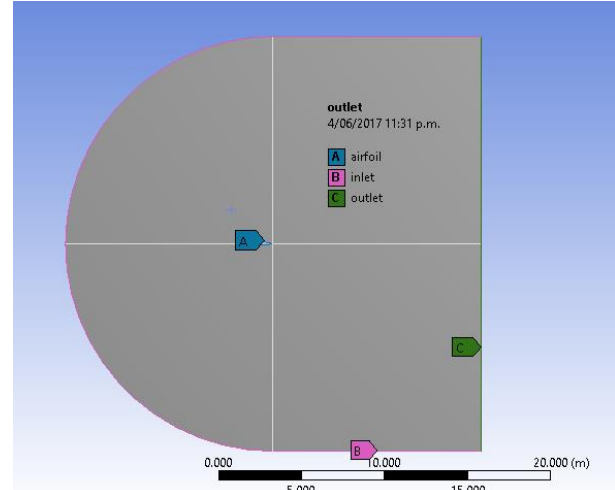


Figura 8. Bordes del campo de flujo. **Fuente:** elaboración propia.

Para el mallado se realiza un análisis de independencia de malla a este mismo perfil, para ver la convergencia de la solución, teniendo como criterio C_l y C_d , y un error mínimo de 2 %, los resultados se observan en la figura 9 y la tabla 2; además se puede apreciar cómo estos coeficientes se acercan a su valor real [13].

Tabla 2. Convergencia de los coeficientes aerodinámicos para el perfil NACA 63-221.

Número elementos	C_l	C_d	Error C_l	Error C_d
80	0.6627	0.10959	-	-
90	0.7753	0.10105	17%	8%
100	0.8497	0.09648	10%	5%
110	0.9033	0.09391	6%	3%
120	0.9467	0.09186	5%	2%
130	0.9861	0.09007	4%	2%
140	1.0096	0.08892	2%	1%

Fuente: elaboración propia.

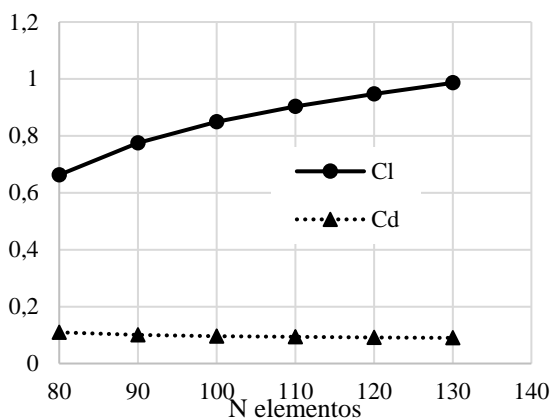


Figura 9. Convergencia de los coeficientes aerodinámicos para el perfil NACA 63-221. **Fuente:** elaboración propia.

Se usan ángulos de ataque de 5 grados, debido a que al usar ángulos mayores el C_d del perfil aumenta, lo que produce una mayor fuerza de arrastre, que afecta el propósito de la turbina, además de que genera vibraciones indeseadas.

Teniendo la solución del campo de flujo, se realizó el proceso de optimización. En este se tomó 1 % como el valor de cambio entre cada una de las iteraciones, y se realizó un cálculo total cada 5 iteraciones, para tener un control sobre la deformación del perfil y verificar el cambio del valor de C_l y C_d . Los resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Comparación de los coeficientes aerodinámicos con los perfiles optimizados.

Perfiles	C_l inicial	C_l final	C_d inicial	C_d final
NACA 63 221	1.018	1.06	0.892	0.088
NACA 63 421	1.465	1.506	0.051	0.054
NACA 64 421	1.295	1.321	0.041	0.042

Fuente: elaboración propia.

Se aprecia que los C_l aumentaron para cada perfil según su condición de trabajo. Esta se tomó como un promedio entre secciones. Además, vemos que el C_d para el NACA 63-221 disminuyó como era requerido.

3.2. Modelado del álabe

Los parámetros iniciales para el desarrollo del álabe fueron tomados de las turbinas Nordex N120 [17] de

1300 KW con una velocidad de viento promedio de 8 m/s [21]. Esta velocidad es la presente en el parque eólico Jepirachi [22], ubicado en la Guajira, Colombia.

Con estos valores de potencia y velocidad, se desarrolló el método BEM, con los perfiles seleccionados, teniendo como resultado la caracterización del álabe, dichas características se muestran en la tabla 4.

Para el centro de rotación de los perfiles se tomó una distancia de 0.30 veces de la cuerda a partir del borde de ataque, debido a que en dicho punto (línea de presión) inciden las fuerzas aerodinámicas [19]. También se implementó un larguero de soporte a lo largo del álabe a la misma distancia del borde de ataque. Los álabes resultantes para los perfiles seleccionados y optimizados se muestran en la figura 10.

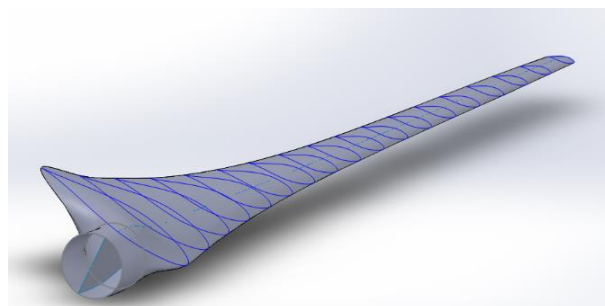
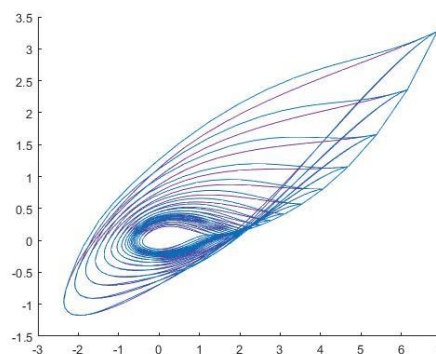


Figura 10. Álabes resultantes. (a) Perfiles seleccionados (morados) y optimizados (azules) y (b) estructura de los álabes. **Fuente:** elaboración propia.

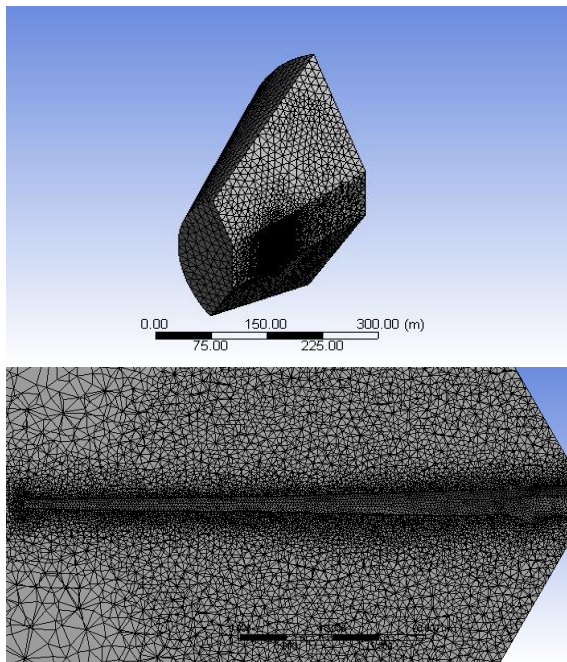
3.2.1. Velocidades y torque sobre los álabes

Se realizó el campo de flujo sobre los álabes con un mallado de cono truncado, en el que solo se tomó un tercio de la turbina total y se analizó un solo álabe, debido a su simetría, con el fin de disminuir el gasto computacional. La malla se muestra en la figura 11.

Tabla 4. Caracterización del álabe con perfiles seleccionados.

R [m]	Φ [°]	C [m]	Vtan [m/s]
7.340	29.649	10.438	10.548
10.399	24.475	8.877	13.143
13.457	20.382	7.551	15.915
16.516	17.300	6.440	18.811
19.574	14.959	5.522	21.786
22.633	12.819	4.777	24.812
25.691	11.417	4.184	27.879
28.750	10.281	3.721	30.973
31.808	9.345	3.368	34.085
34.867	8.561	3.103	37.213
37.925	7.895	2.906	40.351
40.984	7.321	2.755	43.498
44.042	6.819	2.629	46.652
47.101	6.368	2.508	49.811
50.159	6.412	2.370	52.999
53.217	5.958	2.194	56.161
56.276	5.420	1.960	59.319
59.334	4.423	1.646	62.442

Fuente: elaboración propia.

**Figura 11.** Mallado del campo de flujo. (a) Vista isométrica y (b) vista en detalle de la superficie en contacto con el álabe. Fuente: elaboración propia.

Para las condiciones de contorno se tomó la velocidad de entrada de 8 m/s, que actúan sobre las superficies *inlet* e *inletTop*, el contorno de salida *outlet* es tipo *outlet*-

pressure, la superficie en contacto con el álabe *blade* es tipo *Wall*, y por ultimo las zonas de interfaz o de simetría *period1* y *period2* son de tipo *interface*. Estos bordes se muestran en la figura 13, que

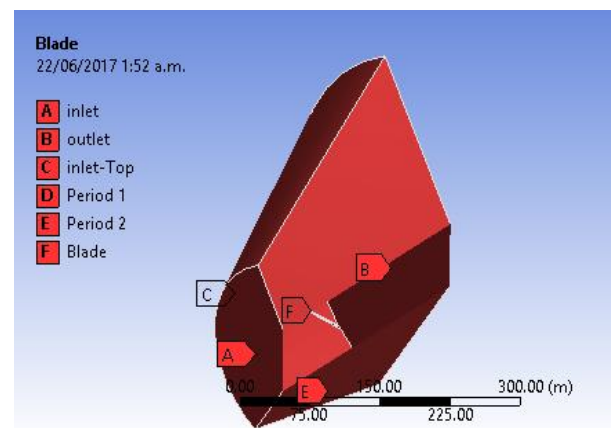
La figura 13 muestra las velocidades tangenciales del álabe de los perfiles seleccionados, teniendo una velocidad en m/s máxima de 63 y mínima de 9.7, que concuerdan con la velocidad obtenida por el método BEM de 62 y 10, respectivamente, con un error relativo del 1.6 % y del 3 %, lo cual permite validar el mallado y las condiciones de contorno evaluadas anteriormente.

Al igual que con las velocidades tangenciales se obtuvieron y validaron los valores del torque generado para cada tipo de álabe, con el torque generado por una turbina de 1300 KW. Estos valores se pueden observar en la tabla 5. Como se observa, el torque generado por la turbina con los perfiles optimizados es mayor con respecto a la otra.

Tabla 5. Torques generados por las turbinas.

Turbina	Torque [N*m]	Diferencia [%]
NORDEX	1242829	-
Original	1260492	1.42%
Optimizada	1313226	4.18%

Fuente: elaboración propia.

**Figura 12.** Bordes del campo de flujo. Fuente: elaboración propia.

La figura 13 muestra las velocidades tangenciales del álabe de los perfiles seleccionados, teniendo una velocidad en m/s máxima de 63 y mínima de 9.7, que concuerdan con la velocidad obtenida por el método BEM de 62 y 10, respectivamente, con un error relativo del 1.6 % y del 3 %, lo cual permite validar el mallado y las condiciones de contorno evaluadas anteriormente.

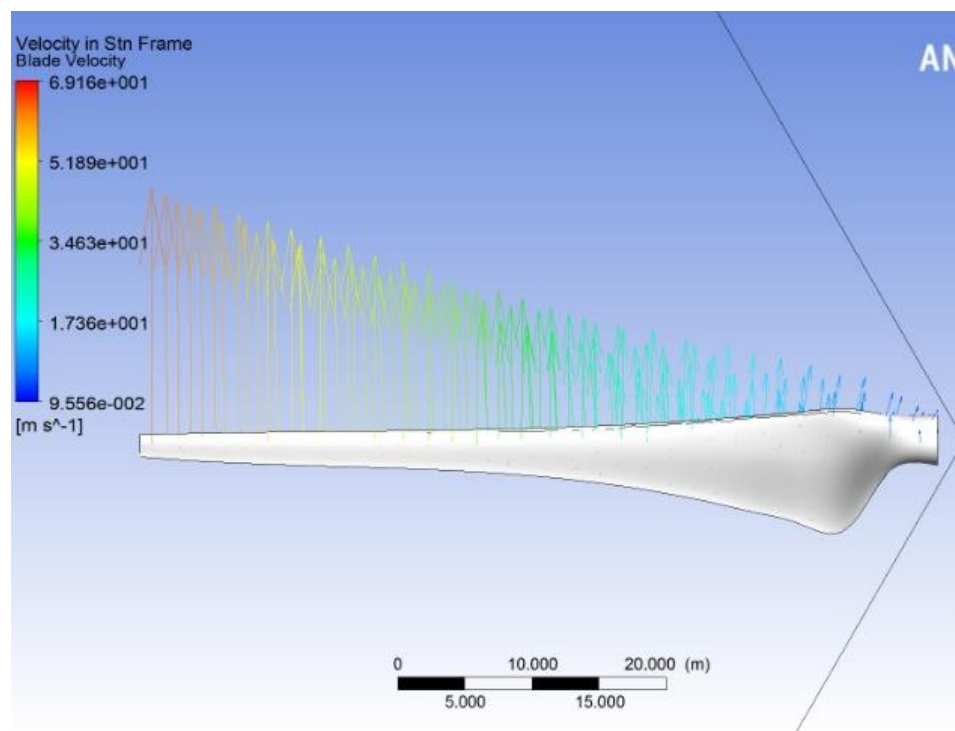


Figura 13. Velocidades a lo largo del álabe. **Fuente:** elaboración propia.

Al igual que con las velocidades tangenciales se obtuvieron y validaron los valores del torque generado para cada tipo de álabe, con el torque generado por una turbina de 1300 KW. Estos valores se pueden observar en la tabla 5. Como se observa, el torque generado por la turbina con los perfiles optimizados es mayor con respecto a la otra.

Tabla 5. Torques generados por las turbinas.

Turbina	Torque [N*m]	Diferencia [%]
NORDEX	1242829	-
Original	1260492	1.42%
Optimizada	1313226	4.18%

Fuente: elaboración propia.

3.2.2. Esfuerzos y deformaciones sobre álabes

Para los álabes se utilizó un material ortótropo, utilizado comúnmente en la construcción de estas, y sus propiedades se muestran en la tabla 6. Los espesores seleccionados para los largueros y la superficie del álabe se encuentran en la tabla 7.

Tabla 6. Propiedades del material del álabe.

Propiedad	Valor
Densidad (kg/m ³)	1550
Módulo de Young-X (Pa)	1.1375E+11
Módulo de Young-Y (Pa)	7583000000
Módulo de Young-Z (Pa)	7583000000
Relación de poisson-XY	0.32
Relación de poisson-YZ	0.37
Relación de poisson-XZ	0.35
Módulo de corte-XY (Pa)	5446000000
Módulo de corte-YZ (Pa)	2964000000
Módulo de corte-XZ (Pa)	2964000000

Fuente: elaboración propia.

Los valores de las cargas de presión sobre los álabes son transferidos del modelo numérico del campo de flujo. Con estas se obtienen los esfuerzos de Von Mises y desplazamientos totales, como se observa en las figuras 14 y 15. Los esfuerzos son mayores sobre el álabe optimizado, debido a que las fuerzas y momentos que actúan sobre este son mayores espesores para la superficie del álabe y para el larguero.

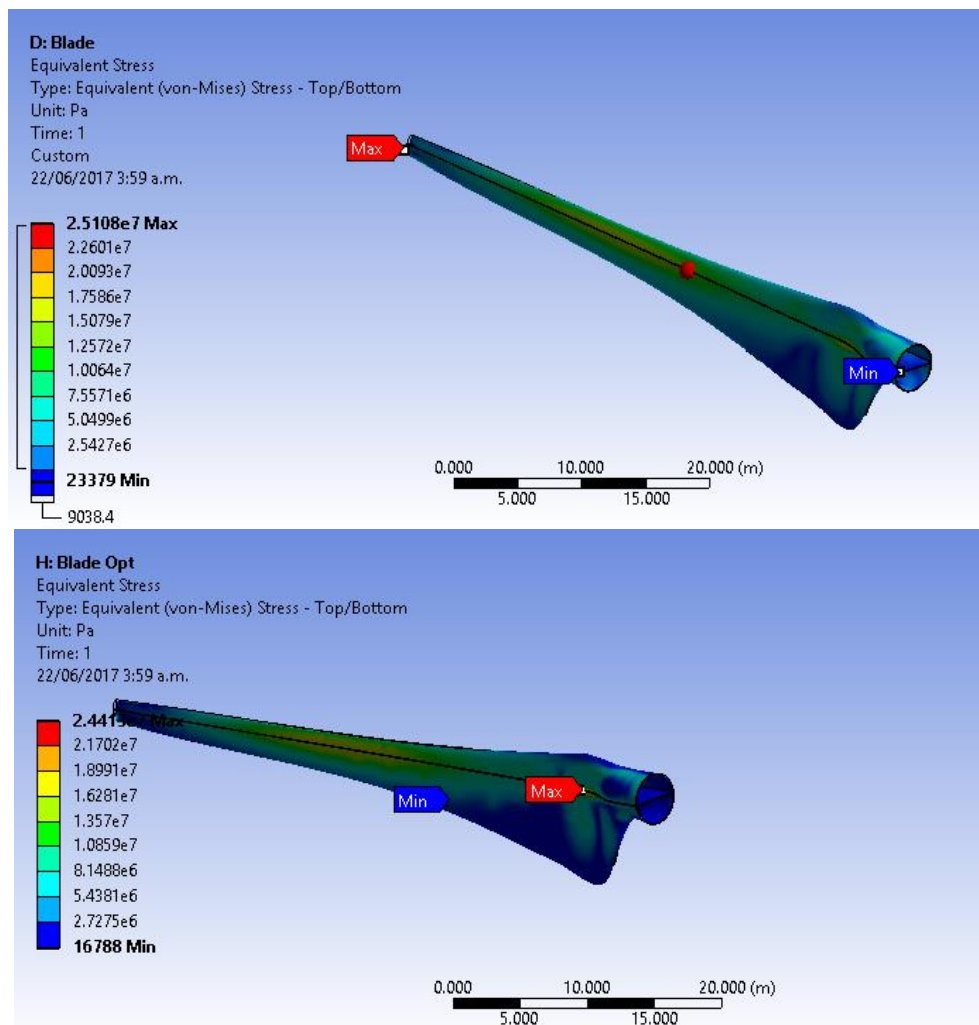


Figura 14. Esfuerzos sobre los álabes (a) original y (b) optimizado. **Fuente:** elaboración propia.

Tabla 7. Espesores para la superficie del álabes y para el larguero.

Superficie del álabes	
X (m)	Espesor (m)
-60	0.005
-1.8	0.1
Larguero	
X (m)	Espesor (m)
-1.8	0.1
-60	0.03

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

Se desarrolló un modelo de simulación numérica de la interacción fluido estructura del álabes y el campo de flujo, y se obtuvo el torque necesario para la validación

del álabes optimizado y los desplazamientos y esfuerzos sobre este. Se pudo observar que los desplazamientos y esfuerzos son mayores en el álabes optimizado, debido que las fuerzas y momentos actuantes sobre este son mayores.

Se definió la geometría del álabes por medio del método BEM, validándolo con la geometría de una turbina N120 de 1300 KW, teniendo una diferencia mínima entre los principales parámetros, como son su envergadura y velocidad de rotación.

A partir de la selección de los perfiles para cada sección del álabes, y mediante un proceso de optimización de sensibilidad con respecto a la geometría, se obtuvieron álabes con un torque un 4.18 % mayor al álabes inicial, con lo que se logró obtener mayor potencia a partir del cambio geométrico de los perfiles a lo largo del álabes.

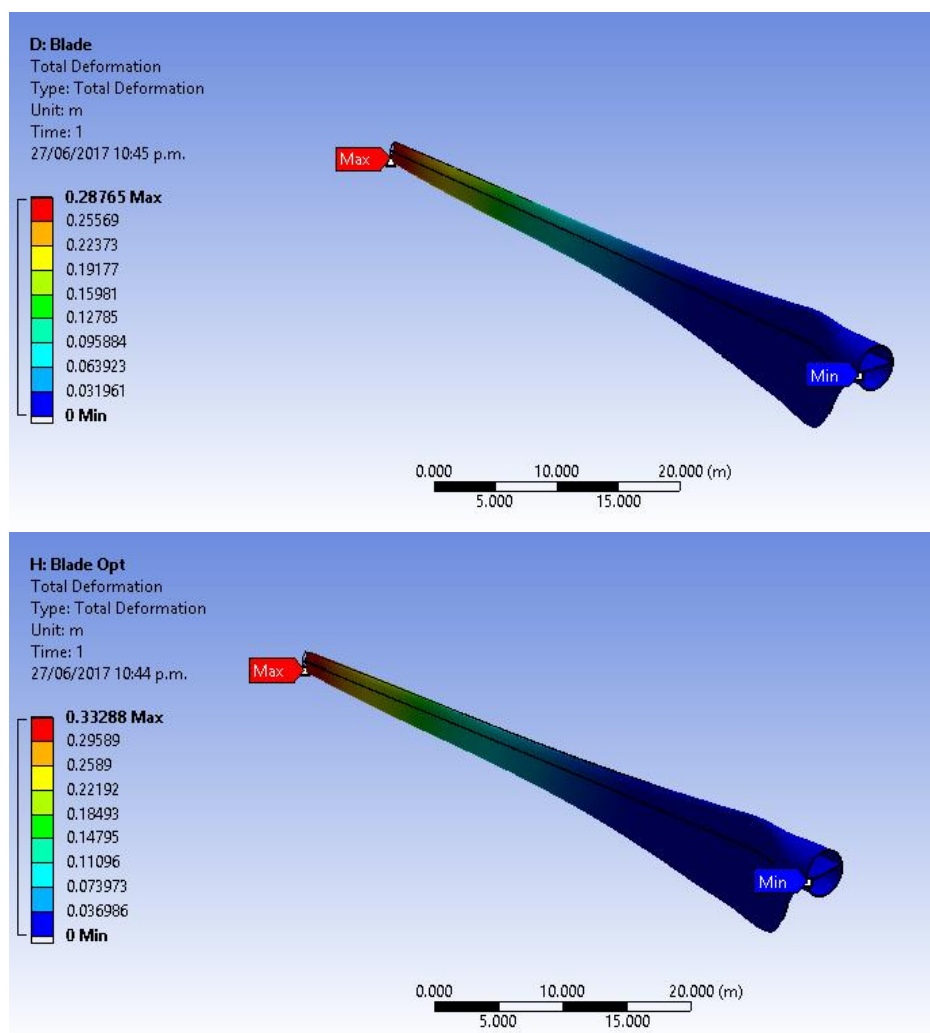


Figura 15. Desplazamientos de los álabes (a) original y (b) optimizado. **Fuente:** elaboración propia.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el proyecto Capital Semilla 1742 de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, de la Universidad Industrial de Santander.

Referencias

- [1] P. P. Vergara-Barrios, J. M. Rey-López, G. A. Osma-Pinto, and G. Ordoñez-Plata, "Evaluación del potencial solar y eólico del campus centra de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga, Colombia," *Rev. UIS Ing.*, vol. 13, 2, pp. 49–57, 2014.
- [2] Á. O. Díaz-Rey, J. E. González-Gil, O. A. González-Estrada, Á. Díaz Rey, J. González Gil, and O. A. González-Estrada, "Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna," *Rev. UIS Ing.*, vol. 17, no. 1, pp. 143–154, 2018, doi:<https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018013>.
- [3] A. Rodriguez, "Análisis cfd de un álabes del último paso de una turbina de vapor," Universidad Politécnica de Madrid, 2016.
- [4] A. Ayestarán, C. Graciano, and O. A. González-Estrada, "Resistencia de vigas esbeltas de acero inoxidable bajo cargas concentradas mediante elementos finitos," *Rev. UIS Ing.*, vol. 16, no. 2, pp. 61–70, Sep. 2017, doi:10.18273/revuin.v16n2-2017006.
- [5] E. E. Gaona, P. A. Mancera, C. L. Trujillo, and C. L. Trujillo Rodriguez, "Algoritmo de encaminamiento con reconfiguración de topología para red de sensores inalámbricos aplicada a una Microrred en modo 'Isla,'" *Rev. UIS Ing.*, vol. 15, no. 2, pp. 93–104, Jan. 2016,

doi:<https://doi.org/10.18273/revuin.v15n2-2016008>.

[6] W. J. Zhu and W. Z. Shen, “Integrated airfoil and blade design method for large wind turbines,” in *International Conference on aerodynamics of Offshore Wind Energy Systems and wakes (ICOWES2013)*, 2013, pp. 1–10.

[7] P. J. Moriarty and A. C. Hansen, “AeroDyn Theory Manual,” Golden, Colorado, 2005.

[8] K. Dykes *et al.*, “Introducing WISDEM Integrated System Modeling for Wind Turbines and Plants,” Golden, Colorado, 2014.

[9] C. Phelps and J. Singleton, “Wind Turbine Blade Design,” Ithaca, NY, 2015.

[10] C. Stout *et al.*, “Efficiency Improvement of Vertical Axis Wind Turbines with an Upstream Deflector,” *Energy Procedia*, no. April, pp. 1–10, 2016.

[11] A. Lecuona Neumann, *La Energía Eólica: Principios básicos y tecnología*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2002.

[12] R. van Rooij and N. Timmer, “Design of Airfoils for Wind Turbine Blades,” Delft, 2004.

[13] F. Bertagnolio, N. Sorensen, J. Johansen, and P. Fuglsang, “Wind turbine airfoil catalogue. Risø-R-1280 (EN),” Roskilde, Denmark, 2001.

[14] M. Hepperle, “JavFoil User’s Guide.” pp. 1–45, 2014.

[15] D. Almazo, M. Toledo, M. Vega del Carmen, J. Abugaber, O. José Pineda, and A. Reyes, “Selección y diseño de hélices,” in *15 Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas*, 2015, pp. 1–6.

[16] G. Ingram, “Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method. Version 1.1,” Durham, 2011.

[17] Nordex, “N60 / 1300 kW. Long-term experience all over the world.” Nordex Brochure.

[18] R. A. Bastianon, “Cálculo Y Diseño De la Hélice Óptima Para Turbinas Eólicas,” Buenos Aires, 2008.

[19] R. Gasch and J. Tvele, *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation*, 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.

[20] A. Khare, A. Singh, and K. Nokam, “Best practices in grid generation for CFD application using HyperMesh,” in *ATC: HyperWorks Technology Conference 2009*, 2009, pp. 1–10.

[21] IDEAM, “Atlas Interactivo - Vientos,” 2015.

[22] M. P. Rincón, “Parque eólico Jeparachi, Colombia | EJAtlas,” 2014.